



# Robottidatan analysointi opti- mointia varten

Tiina Alaviitala

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2023

Tieto- ja viestintäteknikka  
Ohjelmistotekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tieto- ja viestintätekniikka  
Ohjelmistotekniikka

ALAVIITALA, TIINA  
Robottidatan analysointi optimointia varten

Opinnäytetyö 41 sivua, joista liitteitä 2 sivua  
Huhtikuu 2023

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, millaista dataa teollisuusrobotilta saadaan 3D-tulostustilanteessa, nähdäänkö saadusta datasta joitain optimoinnin kannalta mielenkiintoisia trendejä sekä voidaanko dataa ja siitä saatua tietoa hyödyntää tulostusprosessin ja -jäljen optimoinnissa. Työ tehtiin Tampereen ammattikorkeakoulussa, Tietotekniikan ja Robotiikan osaston yhteisprojektissa.

Datan analysointi suoritettiin Python-ohjelmointikielellä hyödyntäen Pythonin eri data-analytiikkakirjastoja.

Opinnäytetyön aikana ilmeni, että tulostusprosessin yhteydessä dataan oli päätyntä datapisteitä, jotka joko eivät liittyneet koko tulostusprosessiin tai olivat jollain muulla tavalla virheellisiä. Suurin osa data-analytiikkaan käytetystä ajasta kuluikin datasetin siistimiseen, parsimiseen ja oikean datasetin etsimiseen virheellisen datan joukosta. Osa mittauksista oli myös tässä yhteydessä kadonnut kokonaan.

Datasetistä ei löytynyt suoraan mitään erityisiä trendejä, joita voisi käyttää tulostusprosessin optimointiin. Mikäli tutkimusta jatketaan vielä tämän opinnäytetyön jälkeen, on syytä tehdä tarkempi suunnitelma datan keruusta, varmistaa että datankeruumoduuli toimii oikein, sekä määritellä tarkemmin, mikä on tulostamisen kannalta ”riittävän hyvä” tulostusjälki.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in ICT Engineering  
Software engineering

ALAVIITALA, TIINA:  
Analysis of Robot Data for Optimization

Bachelor's thesis 41 pages, appendices 2 pages  
April 2023

---

The purpose of this Bachelor's thesis was to clarify what sort of data can be acquired during 3D printing with an industrial robot. Another goal of this thesis was to find out if any specific trends can be seen from the data and whether that knowledge could help in the optimization of 3D printing printout. The thesis was done in Tampere University of Applied Sciences in a co-op project between IT engineering and Robotics.

The data analysis was performed with Python utilizing Python's different libraries for data analysis.

During the 3D printing process some unwanted data had appeared in the data set. This data had either nothing to do with the printing process or it was otherwise faulty. Most of the time spent in data analysis was thus used for cleaning and parsing data and finding out where the actual data from the printing process is. In this phase some of the actual measurements had disappeared completely.

The dataset showed no specific trends that could be utilized to optimize the printing process. If the project continues after this thesis, the data collection module should be checked and a better plan for gathering data must be created. Also, a clearer definition of "proper enough" printout quality must be resolved.

---

Keywords: 3D printing, data analysis, industrial robots, optimization

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	6
2	3D-TULOSTUS .....	8
	2.1 Materiaalia lisäävä valmistus .....	8
	2.1.1 Valmistustekniikat.....	8
	2.1.2 Tulostusjälkeen vaikuttavat tekijät .....	9
	2.2 3D-tulostus teollisuusrobotilla .....	9
	2.2.1 Teollisuusrobotit .....	9
	2.2.2 Tulostusprosessi.....	10
3	3D-TULOSTUS TAMK:N LAITTEISTOLLA.....	12
	3.1 Käytetty laitteisto .....	12
	3.2 Tulostusprosessi ja datan kerääminen.....	15
4	DATA-ANALYYSI JA TULOSTEN TARKASTELU .....	18
	4.1 Data-analysissä käytetyt työkalut, ohjelmointikieli ja kirjastot.....	18
	4.1.1 Python-kirjasto: pandas .....	18
	4.1.2 Python-kirjasto: NumPy .....	18
	4.1.3 Python-kirjasto: seaborn.....	18
	4.2 Datan siistintä ja kuvaus .....	19
	4.3 Eksploratiivinen data-analyysi.....	19
	4.3.1 Korrelaatiomatriisi ja heat map .....	21
	4.3.2 Varsinaisen datasetin etsintä ja siistiminen .....	22
	4.4 Data-analyysi .....	26
	4.4.1 Sivujen paksuus ja virheen arviointi.....	26
	4.4.2 Eri käsiajonopeuksien vertailu .....	27
	4.4.3 Screw RPM (ruuvin pyörintänopeus) ja TCP-nopeus .....	28
	4.4.4 JX liike .....	29
	4.4.5 JX aika.....	30
	4.4.6 JX nopeus .....	32
	4.4.7 JX Ext torque (robotin arvioima ulkoinen momentti nivelelle X) .....	33
	4.4.8 Johtopäätöksiä viulukuvaajista .....	34
5	POHDINTA .....	35
	LÄHTEET .....	38
	LIITTEET .....	40

**ERITYISSANASTO**

3D-tulostus	materiaalia lisäävä valmistaminen, kappaleen valmistaminen kerroksia lisäämällä
rasterikulma	suuttimen ja x-akselin välinen kulma, joka kahden peräkkäisen kerroksen välillä eroaa 90°
rasteriväli	kahden peräkkäisen kerroksen välinen etäisyys
vapausaste layer	mekanismin liikemahdollisuuksien lukumäärä tulostuskerroksen numero
Screw RPM	ruuvin pyörintä, vastaa käsiajonopeutta, yksikkö kierroksia/min
TCP-nopeus	ruuvin pään liikenopeus, yksikkö m/s
JX liike	robotin nivelen X asennon muutos
JX nopeus	robotin nivelen X nopeus
JX aika	robotin nivelen X liikkuma aika
JX Ext Torque	robotin arvioima ulkoinen momentti nivelelle X
csv	comma separated values, tiedostomuoto, jossa arvot on eroteltu pilkuilla

## 1 JOHDANTO

Materiaalia lisäävä valmistaminen tunnetaan paremmin termillä 3D-tulostus. 3D-tulostuksessa digitaalisen mallin perusteella rakentuu kappale kerroksia lisäämällä. (Barnatt, 2016)

3D-tulostamisen hyödyntämismahdollisuudet ovat laajat: sitä on hyödynnetty esimerkiksi ilmailussa ja avaruustekniikassa, rakentamisessa, vaateteollisuudessa, elintarviketeollisuudessa että terveydenhuollossa. (Rice, 2022)

Avaruustekniikan osalta tuore tapaus on ensimmäinen 3D-tulostettu avaruusraketti, jonka on valmistanut Relativity Space -yhtiö. Terran 1 -raketti on 33,5 metriä korkea ja 7,5 metriä leveä ja sen massasta 85 % on 3D-tulostettua. Raketin valmistamisessa on hyödynnetty 3D-metalliprinttausta, tekoälyä ja autonomista robotiikkaa ja valmistusaika tällaiselle raketille on noin 60 päivää. Raketti oli tarkoitus lähettää kiertoradalle maaliskuussa 2023. (Tapiola, 2023)

Avaruustekniikan ja muiden erikoisalojen tapauksessa kyseessä ovat yleensä erikoistuneet laitteet, joiden tulostusjäljeltä ja tarkkuudelta vaaditaan enemmän kuin tavallisilta 3D-tulostimilta. Kuitenkin suurin osa 3D-tulostamisesta tapahtuu laitteilta, jotka ovat joko teollisessa mittakaavassa (kuten tässä työssä tutkittu ABB:n robottikäsivarsi lisäosineen) tai kotikäyttöön kuluttajille myytävät 3D-tulostimet. Kuitenkin tällaisilla laitteilla tulostamisessa on olemassa omat vaatimuksensa: pohjimmiltaan tavoitteena on saada tulostamalla mahdollisimman valmis ja siisti lopputuote, jota ei tarvitse jälkikäteen juurikaan siistiä. Tähän kysymykseen tämän opinnäytetyön on tarkoitus nyt pureutua data-analyysin keinoin.

Opinnäytetyön keskeisimpinä kysymyksinä olivat:

- Millaista dataa robotilta saadaan tulostustilanteessa?
- Nähdäänkö robotin datassa jotain selkeitä trendejä?
- Voidaanko dataa hyödyntää 3D-tulostamisen optimoinnissa ja jos voidaan, miten?

Tämä opinnäytetyö käsittelee vain robotin tuottamaa dataa ja tämän datan analysointia, eikä se siten ota kantaa siihen, mitä robotin fyysisessä tilassa tapahtuu. Robotin tilassa tapahtuvat asiat ja datan tulkinta sen osalta ovat siten Robotiikan osaston aihepiiriä ja eivät siten sisälly tämän opinnäytetyön laajuuteen.

## 2 3D-TULOSTUS

### 2.1 Materiaalia lisäävä valmistus

Materiaalia lisäävällä valmistuksella (additive manufacturing, jatkossa 3D-tulostus) tarkoitetaan valmistusmenetelmää, jossa valmistetaan kappaleita uusia kerroksia lisäämällä. 3D-tulostuksen voidaan ajatella olevan samantyyppistä kuin laser- tai mustesuihkutulostimella tulostaminen, mutta tulostus on siirretty kolmiulotteiseksi. Perinteisessä tulostamisessa paperille (tai muuten kaksiulotteisesti), kuva muodostuu musteen asettelua ja väriä kontrolloimalla, 3D-tulostuksessa kontrolloidaan tulostusmateriaalin sijoittelua ja kiinnittymistä. (Barnatt, 2016)

#### 2.1.1 Valmistustekniikat

ISO ASTM 52900 -standardi jakaa 3D-tulostusmenetelmät seitsemään eri tyyppiin. Ne ovat materiaalin pursotus, valokovetus altaassa, jauhepetisulatus, materiaalin ruiskutus, sidosaineen ruiskutus, laminointi sekä materiaalin ja lämmön kohdistus. (ISO/ASTM 52900:2021(en), 2021)

Materiaalin pursotuksessa puolinestemäistä materiaalia ruiskutetaan kappaleen muotoon. Valokovetuksessa laser tai muu valonlähde jähmettää peräkkäisiä kerroksia materiaalia nestemäistä polymeeriä. Materiaalin ruiskutuksessa tulostinkärki valikoivasti kerrostaa nestemäistä rakennusmateriaalia pisaroina. Nämä pisarat kiinnitetään UV-valolla tai lämmöllä, tai sitten käytetään materiaalia, joka jähmettyy osuessaan johonkin. Sidosaineen ruiskutuksessa jauhemaisesta materiaalista kerrostetaan kappale ruiskuttamalla sidosainetta valikoivasti. Jauhepetisulatuksessa laseria tai muuta lämmönlähdettä hyväksi käyttäen kappaleen kerrokset muodostuvat jauheesta. Laminoinnissa kappale muodostuu levyistä (paperi, muovi, metalli), jotka yhdistetään toisiinsa. Materiaalin ja lämmön kohdistuksessa laseria tai vastaavaa hyödyntäen kappaleen kerrokset muodostuvat jauhemaisesta materiaalista, joka kiinnitetään lämmön avulla sitä mukaa kun jauhemateriaalia lisätään. (Barnatt, 2016)

Tämän työn robotti hyödynsi materiaalin pursotusta.

## **2.1.2 Tulostusjälkeen vaikuttavat tekijät**

Tulostukseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri tyyppiin: geometria, prosessista johtuvat tekijät ja tulostettavan kappaleen rakenteesta johtuvat tekijät.

Geometriasta vaikuttaviin tekijöihin kuuluvat suuttimen koko ja palon koko. Suuttimen halkaisija voi vaihdella välillä 10  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$ . Yleensä suuttimen koko on asetettu joksikin tietyksi arvoksi (luokkaa 0,4 mm), koska tulostusnopeus ja -tarkkuus on hyvin tasapainotettu. Tulostuskerroksen koko voi riippua esimerkiksi materiaalin lämpötilasta. Paloksi sanotaan 3D-tulostusmateriaalia, jota tulee ulos suuttimesta.

Prosessista johtuvia tekijöitä ovat materiaalin sulamislämpötila, tulostusalustan lämpötila sekä tulostusnopeus. Kaikissa tulostuslaitteissa ei välttämättä ole lämmitettyä alustaa, mutta sellaisissa laitteissa, joissa alusta on lämmitetty, on se yleensä säädetty johonkin vakioarvoon. Tulostusnopeus määrittelee, miten nopeasti tulostimen moottori liikkuu ja se sisältää yleensä myös X- ja Y-akseleita kontrolloivien moottoreiden ja pursottimen moottorin tiedot.

Rakenteesta johtuvia, tulostamiseen vaikuttavia seikkoja ovat kerroksen paksuus, täyttögeometria, täyttötiheys, rasterikulma ja rasteriväli. Rasterikulmalla tarkoitetaan suuttimen ja x-akselin välistä kulmaa, joka kahden peräkkäisen kerroksen välillä eroaa 90°. Rasterivälillä taas tarkoitetaan kahden peräkkäisen kerroksen välistä etäisyyttä. (Manoj Prabhakar et al., 2021)

## **2.2 3D-tulostus teollisuusrobotilla**

### **2.2.1 Teollisuusrobotit**

Robotilla tarkoitetaan uudelleenohjelmoitavaa, monipuolista mekaanista laitetta, jossa on vähintään kolme niveltä. Se on tarkoitettu kappaleiden, työkalujen tai erikoislaitteiden liikuttamiseen ohjelmoitavia liikkeitä hyödyntämällä. Yksinker-

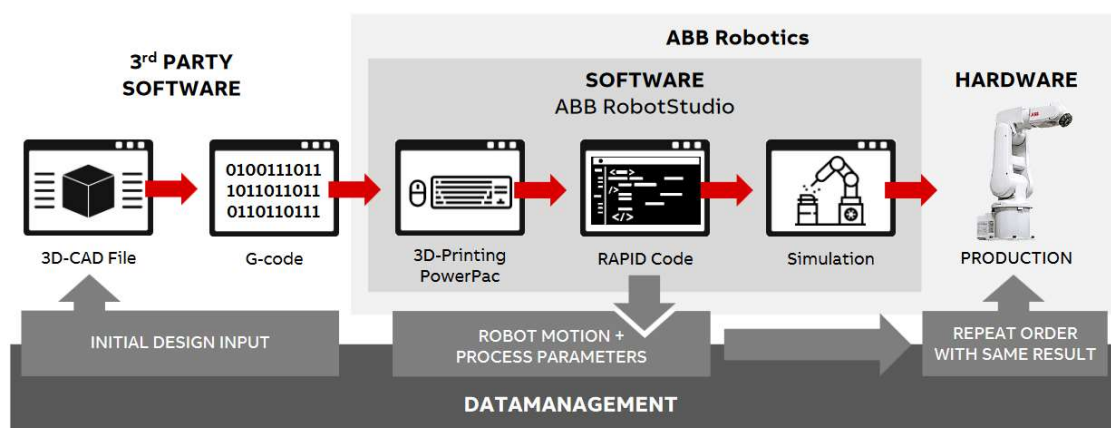
taisimmillaan määriteltynä robotti on laite, joka siirtää työkalun kiinnityslaippaa halutulla tavalla. (Kuivanen, 1999)

ISO 8373 jakaa robotit kuuteen päätyyppiin vapausasteiden perusteella. Vapausasteilla tarkoitetaan mekanismin liikemahdollisuuksien lukumäärää. Vapausasteet voivat olla lineaarisia akseleita tai pyöriviä niveliä ja yleensä yksi vapausaste vastaa yhtä niveltä. Robottityypit ovat suorakulmainen robotti, sylinterirobotti, napakoordinaatistorobotti, Scara-robotti, kiertyvänivelinen robotti ja rinnakkaisrakenteinen robotti. (ISO 8373:2021, 2021)

Suuri osa teollisuusroboteista on kiertyvänivelistä tyyppiä, kuten tässäkin työssä käytetty robotti. Kiertyvänivelisessä robotissa kaikki nivelet kiertyvät ja tukivarret on kytketty peräkkäin. (Kuivanen, 1999)

## 2.2.2 Tulostusprosessi

Kuvassa 1 on esitetty 3D-tulostusprosessin eri vaiheet, kun käytetään ABB:n robottia 3D-tulostimena. Aluksi kuvassa 1 3D-tulostusta varten prosessin alussa tulostettavasta kappaleesta muodostetaan 3D-malli, yleensä CAD-ohjelmistoa tai vastaavaa käyttäen. 3D-malli voidaan myös muodostaa skannaamalla mallikappale tai käyttämällä sekä CAD-ohjelmistoa että mallikappaleen skannausta.



KUVA 1: 3D-tulostusprosessin vaiheet (*RobotStudio 3D Printing PowerPac, presentation*)

Kun digitaalinen 3D-malli kappaleesta on rakennettu, malli syötetään viipalointiohjelmaan. Viipalointiohjelma jakaa 3D-mallin pienempiin viipaleisiin: yleensä

viipaleen paksuus on yksi millimetri. Viipaleista muodostuvaa kokonaisuutta kutsutaan G-koodiksi, joka lähetetään 3D-tulostimelle, joka muuttaa viipaleet RAPID-koodiksi. RAPID-koodi kertoo robotille tarkat tiedot sen liikkumisesta tulostamisen eri vaiheissa. RAPID-koodin avulla voidaan myös simuloida tulostusta ennen varsinaista tulostamista esimerkiksi silloin, jos tulostuksen lopputulos halutaan varmistaa oikeanlaiseksi tai tarkistaa voiko robotti ylipäättään tulostaa kyseessä olevaa kappaletta.

Mahdollisen simuloinnin jälkeen, RAPID-koodi viedään itse robotille, joka erilaisten lisäosien (esim. pursotin) suorittaa varsinaisen tulostamisen. (RobotStudio 3D Printing PowerPac, presentation, pdf-file)

### 3 3D-TULOSTUS TAMK:N LAITTEISTOLLA

Varsinainen tulostusprosessi ei kuulu tämän opinnäytetyön sisältöön ja se suoritettiin TAMK:n Robotiikan osaston toimesta. Tässä kappaleessa on kuitenkin kerrottu data-analyysin kannalta oleelliset osuudet tulostamisesta lyhyesti.

Tutkittu data kerättiin Robotiikan osaston toimesta heidän itse kehittämänsä datankeruumoduulia hyödyntäen. Opinnäytetyön tekijä ei osallistunut datan keräämiseen, vaan Robotiikalta toimitettiin valmis datasetti, jota tässä työssä on analysoitu.

#### 3.1 Käytetty laitteisto

Työssä käytetty data tuotettiin Tampereen ammattikorkeakoulun robotilla, joka on ABB:n valmistama malli ABB IRB4600-2.55/40. Robotti on kuusinivelinen robottikäsivarsi. Kuvassa 2 on valmistajan kuva kyseisestä robotista.



KUVA 2: ABB IRB4600-2.55/40 -robottikäsivarsi (IRB 4600 | ABB Robotics)

Robotti oli kytketty ABB IRBT2005-liikkumisalustaan. Liikkumisalustan tarkoituksena on mahdollistaa robotin sivuttainen liike rataa pitkin. Liikkumisalusta on esitetty kuvassa 3.



KUVA 3: ABB IRBT2005 -liikkumisalusta (IRBT 2005 for IRB 1520, 1600, 2600, 4600)

Robottiin oli lisäksi kytketty CEAD:n valmistama pursotin, mallia CEAD E25 Extruder. Tämä kyseinen pursotin voidaan kytkeä robottikäsiin ja siinä voidaan käyttää kestumovipellettejä tulostusmateriaalina. (Vincent)

Kuvassa 4 on esitetty valmistajan kuva kyseisestä pursottimesta.

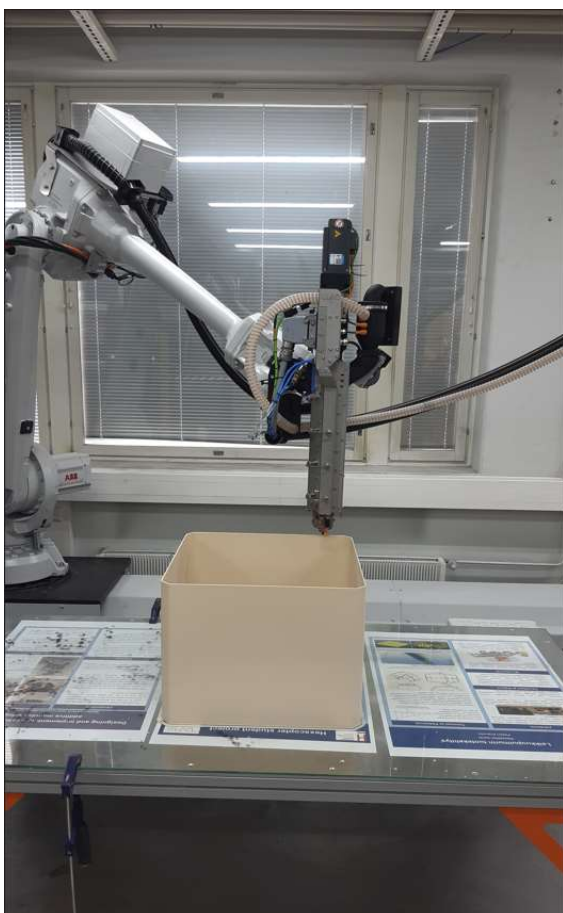


KUVA 4: CEAD E25 Extruder (Vincent)

Itse tulostusprosessissa käytettiin seuraavia ohjelmistoja: Simplify3D, RobotStudio ja RobotStudio 3D Printing Powerpac. Simplify3D on ohjelma, jolla voidaan mallintaa tulostettava kappale, sekä tuottaa rakenteen G-koodi 3D-mallin tulostamista varten (Professional 3D Printing Software | Simplify3D).

Robottia ohjattiin tulostamisen aikana ABB RobotStudiolla ja itse tulostamisessa hyödynnettiin lisäksi RobotStudion lisäosaa 3D Printing Powerpac. (RobotStudio 3D Printing PowerPac, presentation, pdf-file, 2020)

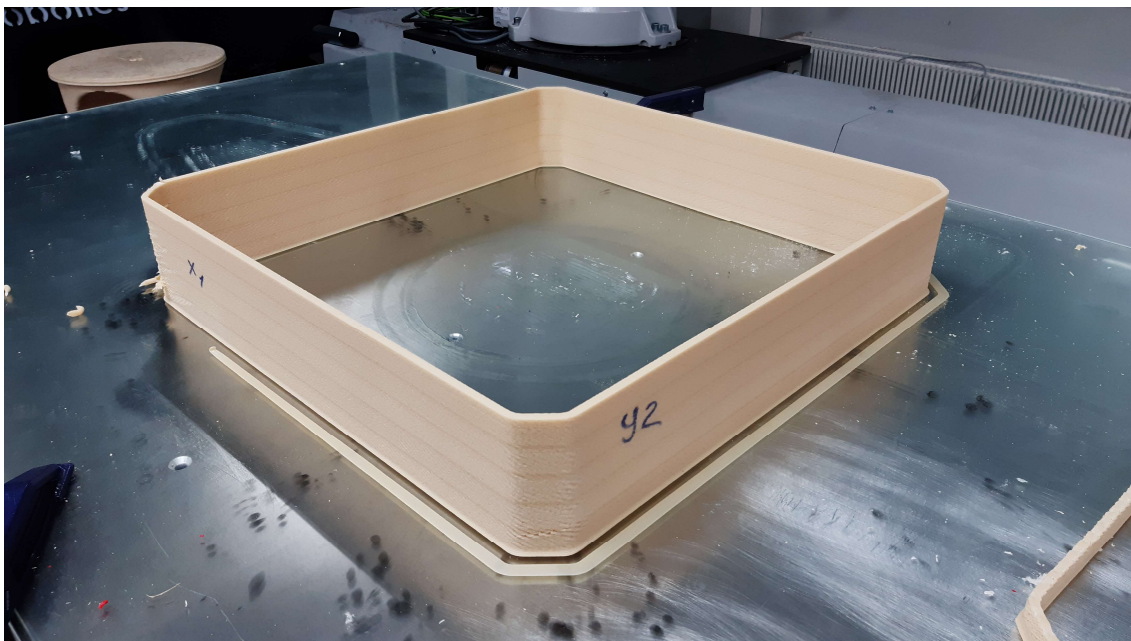
Kuvassa 5 on esitetty kuva TAMK:n tulostuslaitteistosta ja tulostettavasta kappaleesta. Taka-alalla näkyy robotin kiinnittyminen liikkumisalustaan ja etualalla robotin päähän kytketty pursotin. Keskellä kuvaa oleva laatikko on tulostettava kappale.



KUVA 5: TAMK:n robottikäsivarsi, pursotin, osa liikkumisalustasta ja tulostettava kappale (lähde: Tero Haapakoski 2022)

### 3.2 Tulostusprosessi ja datan kerääminen

Datan keräämistä varten tulostettavaksi kappaleeksi valittiin kulmistaan pyöristetty suorakulmio, jossa kerrokset kasvoivat yhden millimetrin ylöspäin jokaisella tulostuskierroksella. Kuvassa 6 on esitetty kuva tulostetusta kappaleesta.



KUVA 6: Tulostettu kappale (lähde: Tero Haapakoski 2022)

Yksinkertaisin tapa saada dataan vaihtelua oli muuttaa tulostusnopeutta. Pursotuspään käsiajonopeutta muutettiin 20 kerroksen välein: nopeutta hidastettiin 10 prosenttiyksikköä jokaisen 20 kierroksen jälkeen. Kunkin 20 kierroksen jälkeen mitattiin kappaleen jokaisen sivun paksuus millimetreissä. Tällä nopeuden muuttamisella pyrittiin saamaan vaihtelua dataan, jota hyödyntäen voisi mahdollisesti tunnistaa laatueroja tulostuksessa.

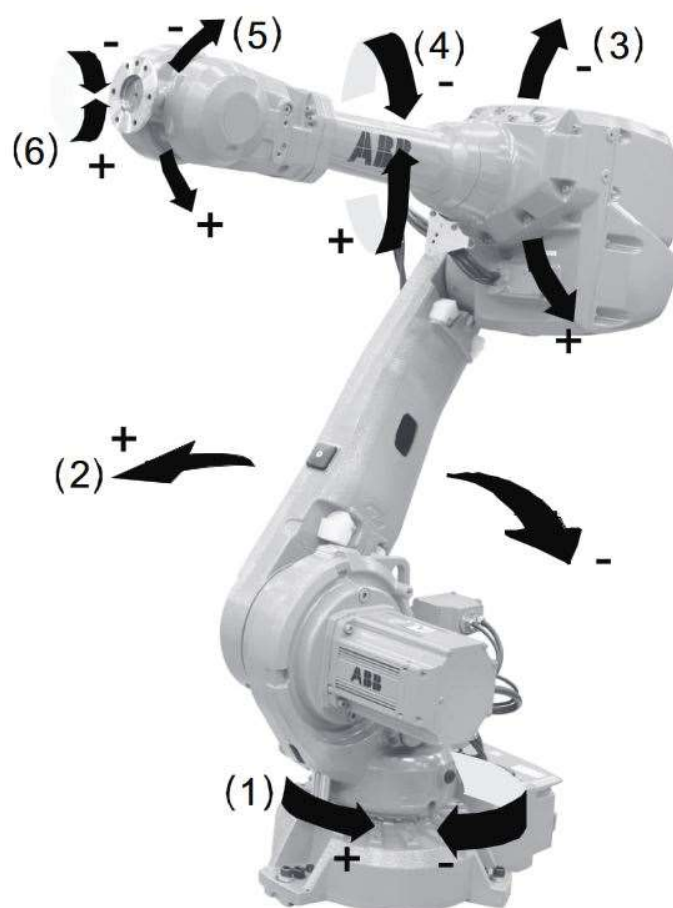
Tulostusprosessi oli ohjelmoitu siten, että tulostuksen alussa asetettiin pursotus-RPM, joka pysyi samana 20 kerroksen ajan. Robotin koodiin oli ohjelmoitu while-silmukka, joka seurasi robotin nopeutta ajon aikana. Tämän lisäksi csv-muotoiseen tiedostoon kerättiin dataa robotin asentoon, nopeuteen ja pursotusnopeuteen liittyen. Tulostusjäljen hyvyyttä arvioitiin jokaisen 20 kierroksen ajon jälkeen mittaamalla jokaisen tulostetun seinämän paksuus. Tavoitteena oli saada tulostettua yhden millimetrin korkuisia kerroksia, joiden paksuus oli kuusi millimetriä.

Robotista kerättiin yhteensä 29 mittausarvoa. Nämä mittausarvot yksiköineen ja selityksineen on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1: Tulostusprosessin yhteydessä mitatut suureet sekä niiden yksiköt ja selitykset

<b>Muuttuja</b>	<b>Yksikkö</b>	<b>Selitys</b>
<b>aika</b>	s	aika, jolloin mittaus otettu
<b>Mittaus</b>	kpl	mittauksen järjestysluku
<b>Layer</b>	kpl	kerros, jolla menossa
<b>Screw RPM</b>	1/min	ruuvin pyörintä, vastaa käsiajonopeutta
<b>TCP-Nopeus</b>	m/s	ruuvin pään liikenopeus
<b>JX liike</b>	aste	robotin nivelen X asennon muutos
<b>JX aika</b>	s	robotin nivelen X liikkuma aika
<b>JX nopeus</b>	mm/s	robotin nivelen X nopeus
<b>JX Ext torque</b>	Nm	robotin arvioima ulkoinen momentti nivelelle X

X on J-arvojen yhteydessä kokonaisluku välillä 1...6 ja JX arvolla tarkoitetaan tiettyä robotin niveltä. Kuvassa 7 on esitetty robottikäsi­varren nivelet ja niiden pyörimissuunnat numeroineen.



KUVA 7: ABB IRB4600 -robottikäsitteiden akselit ja niiden pyörimissuunnat (IRB 4600 | ABB Robotics, 2022)

## 4 DATA-ANALYYSI JA TULOSTEN TARKASTELU

### 4.1 Data-analyysissä käytetyt työkalut, ohjelmointikieli ja kirjastot

Data-analyysi tehtiin pääosin Visual Studio Codella. Ohjelmointikielenä käytettiin Pythonia, versiota 3.10.2, lähinnä siksi että kyseinen ohjelmointikieli oli teki-jälle ennestään tuttu ja siinä olevat kirjastot ja metodit olivat tämän työn suorittamiseen riittäviä. Joidenkin yksinkertaisten laskutoimitusten (esim. virheenarviointi) käytettiin Excel-taulukkolaskentaa.

#### 4.1.1 Python-kirjasto: pandas

pandas on Pythonin kirjasto, jota käytetään datan analysoimiseen, siivoamiseen, tutkimiseen ja muokkaamiseen. Yleensä pandasia käytetään, kun tutkittavana on iso datasetti, esimerkiksi taulukko, jossa on paljon rivejä ja sarakkeita. Kirjastoon kuuluu myös useita tilastollisia funktioita, esimerkiksi `.describe()`, jonka avulla voidaan yhdellä komennolla tarkastaa koko datasetin arvoista keskiarvo, keskipoikkeama, 25%, 50% ja 75% kvantiilit sekä minimi ja maksimi. (pandas - Python Data Analysis Library, 2023)

#### 4.1.2 Python-kirjasto: NumPy

NumPy on avoimen lähdekoodin kirjasto, joka mahdollistaa numeerisen laskennan Pythonissa. Sitä käytetään esimerkiksi taulukko- ja vektorimuotoisen datan käsittelyyn, muokkaamiseen ja laskemiseen. (What is NumPy? — NumPy v1.24 Manual, 2022)

#### 4.1.3 Python-kirjasto: seaborn

Seaborn on Pythonin datavisualisointikirjasto, joka pohjautuu matplotlib-kirjastoon (toinen Pythonin datan visualisointikirjasto). Seabornin avulla on mahdollista yksinkertaista piirtää siistejä ja informatiivisia kuvaajia erityisesti tilastollisesta datasta. (Waskom, 2021)

## 4.2 Datan siistintä ja kuvaus

Alkuperäinen raakadata toimitettiin Robotiikan osastolta yhdessä .csv-tiedostossa (csv, comma separated values, tiedostomuoto, jossa eri arvot on erotettu toisistaan pilkulla), jossa oli yhteensä 178 197 riviä mittauksia. Mitattuja muuttujia oli yhteensä 29 kappaletta. Näiden muuttujien nimet selityksineen ja yksiköineen löytyvät taulukosta 1 (kappale 3.2).

Varsinaiseen raakadataan (.csv-muotoinen tiedosto) oli syntynyt virheellisiä rivejä. Virheelliset rivit johtuivat siitä, että samalla riville oli tulostunut kahden eri mittauksen tuloksia. Koska näitä rivejä ei ollut kuin muutamia, nämä rivit haettiin ohjelmallisesti samalla, kun dataa luettiin pandasin dataframe-tyyppiseen muuttujaan ja korjattiin käsin csv-tiedostosta lisäämällä rivinvaihto kyseiselle riville.

Lisäksi havaittiin, että aikamuuttujaan oli ilmeisesti datankeruumoduulista johtuen tulostunut heittomerkki lukuarvoon alkuun, jolloin Python oletti kyseessä olevan objekti eikä desimaaliluku. Tämäkin ongelma korjattiin ennen datan tarkempaa tarkastelua poistamalla heittomerkit aikasarakkeesta ohjelmallisesti. Lisäksi dataan oli päätyneet datasetin loppuun NA-arvoja, jotka myöskin poistettiin ohjelmallisesti ennen syvempää analyysia.

## 4.3 Eksploratiivinen data-analyysi

Datan siistinnän jälkeen data koostui 29 sarakkeesta, joiden kaikkien tietotyyppi oli float64 (64-bittinen desimaaliluku).

Etukäteen oli tiedossa Robotiikan osastolta, että data-analyysin kannalta mielenkiintoisimmat arvot olisivat TCP-nopeus, Screw RPM (jatkossa ruuvin pyörintänopeus), aika ja Layer. Aika ja Layer kasvavat kumpikin mittausten edetessä, joten niiden tilastoarvot eivät ole oleellisia tässä tapauksessa. Tässä tapauksessa kvantiiliarvot ilmoittavat kohdat, jossa aineisto jakautuu neljänneksiin: 25 %, 50 % ja 75 %. Nämä arvot on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2: Tilastoarvot: ruuvin pyörintänopeus ja TCP-Nopeus koko datasta

	<b>Ruuvin pyörintänopeus (RPM)</b>	<b>TCP-Nopeus (m/s)</b>
<b>lukumäärä</b>	178197	178196
<b>keskiarvo</b>	7,297276	0,022599
<b>keskihajonta</b>	5,701384	0,018462
<b>minimi</b>	0	0
<b>25%</b>	4,46886	0,009488
<b>50%</b>	5,27473	0,012963
<b>75%</b>	8,38828	0,035
<b>maksimi</b>	27,9487	0,200001

Näistä tilastoarvoista on huomattava, että ruuvin pyörintänopeus -mittauksia on yksi enemmän kuin TCP-nopeuden mittauksia, vaikka näitä pitäisi olla sama lukumäärä.

Taulukossa 3 on esitetty layeraika ja pursotimen RPM laitteiston näytöltä luetuna eri käsiajonopeusprosentteilla. Kun tätä arvoa verrataan datasta saatuihin arvoihin, havaittiin että dataa oli syytä tutkia vielä lisää. Nopeimmassa ajossa pursotus RPM oli 12 kierrosta minuutissa, kun taas datan maksimiarvo oli lähes 28 kierrosta minuutissa.

TAULUKKO 3: Layeraika ja pursotus RPM eri käsiajonopeuksissa

<b>Käsiajon nopeus-%</b>	<b>Layeraika (s)</b>	<b>Pursotus RPM</b>
<b>100</b>	42,4	12
<b>90</b>	47,1	10,7
<b>80</b>	52,9	9,6
<b>70</b>	60,5	8,3
<b>60</b>	70,6	7,1

### 4.3.1 Korrelaatiomatriisi ja heat map

Korrelaatio kuvaa kahden eri muuttujan välisen suhdetta. Korrelaatiokerroin kuvaa tämän suhteen välistä voimakkuutta. Korrelaatiokertoimen arvo voi vaihdella välillä  $-1 \dots 1$  tai  $0 \dots 1$ , jolloin on kyseessä absoluuttinen korrelaatiokerroin.

Korrelaatiokertoimen arvoa voidaan tulkita seuraavasti:

- $-1$  tai lähellä sitä: negatiivinen korrelaatio eli muuttujat liikkuvat synkronisesti mutta eri suuntiin. Tällöin kun toinen muuttuja kasvaa, toinen pienenee samaan tahtiin.
- $0$  tai hyvin lähellä sitä, ei korrelaatiota eli muuttujilla ei ole minkäänlaista suhdetta toisiinsa.
- $1$  tai lähellä sitä: positiivinen korrelaatio eli muuttujat liikkuvat synkronisesti samansuuntaisesti. Tällöin kun toinen muuttuja kasvaa, kasvaa toinenkin muuttuja. (Taylor, 2023)

Korrelaatiomatriisi kuvaa datasetin kaikkien muuttujien korrelaation kaikkiin muihin muuttujiin. Korrelaatiota kuvaa korrelaatiokerroin ja ne on järjestetty nelionmuotoiseksi matriisiksi. Korrelaatio on symmetrinen, joten muuttujan  $a$  korrelaatio muuttujaan  $b$ , on sama kuin  $b$ :n korrelaatio  $a$ :n. (Tilastokoulu | 4.3 Korrelaatio)

Usein korrelaatiomatriisiin liitetään myös heatmap, joka kuvaa ilmiön suuruutta kahden eri muuttujan välillä (Patil, 2022; Yi | A Complete Guide to Heatmaps, 2021).

Koko datasetistä piirrettiin kuvaaja, joka sisältää datasetin kaikkien muuttujien korrelaatiot toisiinsa yhdistettynä heatmappiin. Kyseessä on suurikokoinen kuvaaja, joka löytyy liitteestä 1.

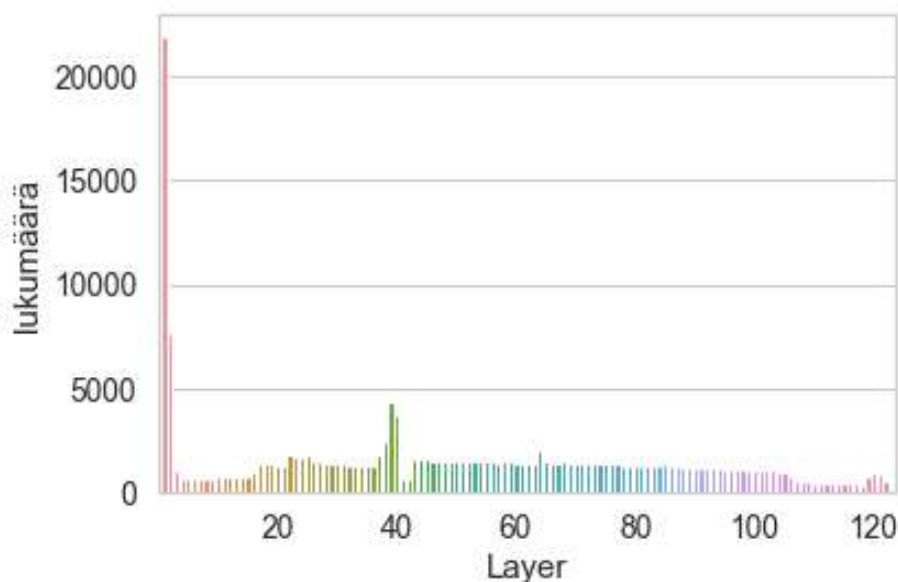
Kuvaajassa negatiivinen korrelaatio (arvot lähellä  $-1$ ) on merkitty valkoisella ja värikoodaus etenee valkoisesta tummansiniseen, kun lähestytään positiivista korrelaatiota (arvot lähellä  $1$ :stä). Kuvasta havaitaan, että koko datasetin osalta melko suuri positiivinen korrelaatio on havaittavissa J1 nopeuden ja J4 nopeuden välillä ( $0,93$ ) sekä J2 ja J3 ext torquen välillä ( $0,77$ ). Nämä akselit siis näyt-

täisivät liikkuvan synkronisesti. Suuri negatiivinen korrelaatio taas J1 nopeuden ja J5 nopeuden (-0,83), J2 ja J3 nopeuksien välillä (-0,98) sekä J4 ja J6 nopeuksien välillä (-0,8). Nämä mittaukset näyttäisivät liikkuvan synkronisesti, mutta eri suuntiin. Lisäksi kuvaajasta nähdään, että ajan, mittauksen ja layerin välillä on positiivinen korrelaatio: aika – mittaus: 0,84, aika - layer: 0,71 ja mitaus - layer: 0,84. Tämä oli toisaalta hyvin odotettavaa, koska sekä aika, mitauksen järjestysluku ja layer kasvavat kaikki tulostuksen edetessä.

Kuvaaja kuitenkin synnyttää lisää kysymyksiä koko datasetin oikeellisuuden suhteen: kaikilla J-liikkeillä ja J-ajoilla korrelaatio on 1 tai hyvin lähellä sitä. J-liikkeet ja J-ajat ovat tämän perusteella datasetin kokonaismitalta hyvin samankaltaisia. Käytännössä, mikäli tämä olisi oikea datasetti tarkoittaisi se sitä, että kaikki nivelet liikkuisivat täsmälleen samantahtisesti, mikä vaikuttaa robottikäsi-varren rakennetta katsottaessa (kuva 7) hyvin epätodennäköiseltä.

#### **4.3.2 Varsinaisen datasetin etsintä ja siistiminen**

Aluksi tarkastettiin, onko aika edennyt kronologisesti välin 0 s – 5465 s. Ohjelmallisesti koko datasetistä haettiin mahdollisia nollakohtia ajalle, ja havaittiin että aika oli nollaantunut ajon aikana yhteensä 720 kertaa. Tämän jälkeen otettiin tarkasteluun myös layer-luku, josta laskettiin eri layereiden lukumäärä. Koko datasetissä oli yhteensä 21 881 datapistettä, jossa oltiin layerilla 1, kun taas layerilla 2 mittauksia oli 7666 kappaletta. Eri layereiden mittaustuloksista on piirretty kuvaaja, joka on esitetty kuviossa 1.



KUVIO 1: Eri layereiden mittauspisteiden lukumäärät koko datasetissä

Mittaus-muuttujan nollautuminen tarkastettiin ja tämä tapahtui yhteensä 14 kertaa. Yhtään sellaista mittauksista, missä sekä aika, että mittaus olisi nollaantunut, ei datasetistä kuitenkaan löytynyt.

Tämän perusteella voidaan epäillä, että mittauksissa oli selkeästi siis tapahtunut jotain odottamatonta ja on mahdollista, että datasettiin oli päätyntä jotain sinne kuulumatonta ja/tai mittauksessa oli jotain epäonnistunut.

Datasetin loppupuolelta, indeksiarvosta 142159 löytyi kohta, josta sekä mittauksen numero, aika että layer-luku kasvoivat loogisesti. Jostain syystä kuitenkin ensimmäiset 21 layeria olivat jääneet kokonaan kirjaamatta tai ne olivat kadonneet muiden dataan kuulumattomien mittauksien joukkoon. Näin datasetistä lopulta löydettiin varmuudella vain neljä mittauksista: 90 %, 80 %, 70 % ja 60 % ajonopeuksilla ajatut. Tämä osuus datasta tallennettiin omaan pandas-dataframeen ja tästä dataframeesta tehtiin vielä neljä pienempää dataframea, yksi kullekin ajonopeusprosentille.

Kun näiden mittauksien ruuvien pyörintänopeuden keskiarvoja verrattiin CEAD:n näytöltä kirjattuihin arvoihin, voidaan todeta, että kyseessä ovat oikeat mittaukset. Keskiarvot ja CEAD:n näytöltä kerätyt arvot esitetty taulukossa 4. 60 %:n nopeuden tapauksessa maksimiarvo on sama kuin koko datasetin maksimiarvo. Tässä mittauspisteessä robotti on juuri lähtenyt liikkeelle ja se ei ole vielä saa-

vuttanut asetettua arvoa ruuvin pyörintänopeudelle. Robotin lähtiessä liikkumaan arvot saattavat erota asetetuista arvoista. Tällaiset piikit ovat vain hetkelisiä, eikä niitä ole kuin yhden mittauksen kohdalla.

TAULUKKO 4: Koko siistityn datasetin ja eri käsiajonopeuksien tilastoarvot sekä CEAD:n näytöltä kirjattu arvo Screw RPM:lle

<b>datasetti</b>	<b>siistitty data</b>	<b>90 % nopeus</b>	<b>80 % nopeus</b>	<b>70 % nopeus</b>	<b>60 % nopeus</b>
<b>muuttuja</b>	<b>Ruuvin pyörintänopeus</b>	<b>Ruuvin pyörintänopeus</b>	<b>Ruuvin pyörintänopeus</b>	<b>Ruuvin pyörintänopeus</b>	<b>Ruuvin pyörintänopeus</b>
<b>lukumäärä</b>	36038	7642	8565	9398	10433
<b>keskiarvo</b>	8,52856	10,62207	9,16901	8,028403	6,919857
<b>keskihajonta</b>	2,04945	1,130299	1,919547	1,663259	1,302332
<b>minimi</b>	0	0	0	0	0
<b>25%</b>	7,17949	10,7692	9,59707	8,38828	7,17949
<b>50%</b>	8,38828	10,7692	9,59707	8,38828	7,17949
<b>75%</b>	9,59707	10,7692	9,59707	8,38828	7,17949
<b>maksimi</b>	14,3956	10,8425	9,6337	11,7949	14,3956
<b>CEAD:n näytöltä</b>		10,7	9,6	8,3	7,1

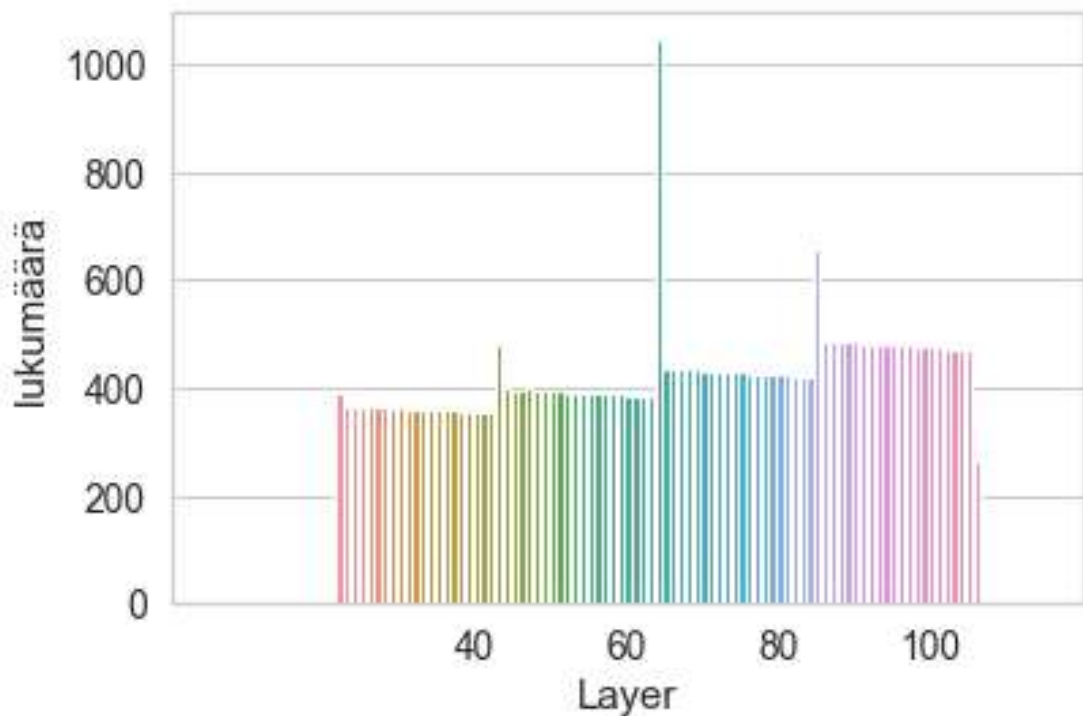
Analyysiin valittu siistitty datasetti sisältää 36038 riviä ja 29 saraketta.

Taulukosta 4 nähdään, että hitaampien nopeuksien (ajonopeusprosentti 60 - 90 %) tapauksessa 25 %, 50 % ja 75 % kvantiilien arvot ovat hyvin lähellä keskiarvoa. Suurta vaihtelua ruuvin pyörintänopeus -muuttujassa ei siis ole. Kun näitä arvoja verrataan taulukon 3 ohjausyksiköstä kirjattuihin arvoihin, ei näissä ole myöskään kovin suurta eroa havaittavissa. Keskihajonta on eri nopeuksien kohdalla myös kohtalaisen pieni, tätä arvoa suurentaa myös se, että mittausdassassa on pisteitä, joissa robotti ja pursotinkärki eivät liiku lainkaan. Tämä selittää myös sen, miksi minimi on jokaisessa ajonopeusprosentissa 0. Näissä nollokohdissa on säädetty robotin liikkumisnopeutta.

Siistitystä datasetistä piirrettiin myös samanlainen korrelaatiomatriisin ja heatmapin yhdistelmä kuin koko datasetistä. Se on esitetty liitteellä 2.

Nyt JX liikkeiden ja JX ajan välillä ei ole pelkästään positiivista korrelaatiota arvolla 1, vaan korrelaatio vaihtelee välillä 0,5 - 1. Aika, mittaus ja layer korreloivat keskenään arvolla 1, mikä oli odotettavaa. J1 ja J4 nopeus korreloivat positiivisesti J6 Ext torquen kanssa (0,92 ja 0,86) kun taas J5 nopeus ja J4 Ext torque korreloivat negatiivisesti J6 Ext torquen kanssa (-0,78 ja -0,85).

Siistitystä datasetistä piirrettiin myös kuvaaja eri layer-arvojen mittauspisteiden lukumäärästä. Tämä kuvaaja on esitetty kuviossa 2.



KUVIO 2: siistityn datasetin eri layereiden mittauspisteiden lukumäärät

Kuvion 2 perusteella nähdään, että mittauspisteiden lukumäärät/layer ovat pysyneet hyvin samansuuntaisina, ja lisäksi kuvaajasta voidaan havaita layerit, joiden kohdalla nopeutta on säädetty (korkeammat piikit kuvaajassa). Mittaustulosten lukumäärä eri käsiajonopeusprosentteille tulisi olla samansuuntainen, koska nopeus on 20 kierroksen ajan sama ja se toteutuu tässä tapauksessa. Lisäksi, koska datankeruumoduuli kerää tietoa tasa-aikavälein, nopeuden hi-

dastuessa mittauspisteitä tulee hitaammilla nopeuksilla enemmän kierroksen aikana.

Näiden tietojen perusteella voidaan todeta, että oikeat mittaustulokset ovat juuri tässä kohtaa datasettiä ja 100 % nopeudella ajettu data on jäänyt tallentumatta csv-tiedostoon muiden käsiajonopeusmittausten yhteyteen. Mahdollista on myös se, että tämä 100 % nopeudella suoritettu ajo on myös tallentunut csv-tiedostoon, mutta se on kadonnut jonnekin datasetin muiden pisteiden joukkoon.

#### 4.4 Data-analyysi

##### 4.4.1 Sivujen paksuus ja virheen arviointi

Neliönmuotoisen tulostettavan kappaleen sivujen paksuudet mitattiin aina 20 tulostuskierroksen jälkeen. Näiden mittausten tulokset on esitetty taulukossa 5. Arvot X1, X2, Y1 ja Y2 kuvaavat suorakulmion sivujen paksuutta millimetreissä. Sivun paksuuden tavoitearvoksi oli määritelty kuusi millimetriä.

TAULUKKO 5: Tulostetun kappaleen sivujen paksuudet eri käsiajonopeuksien tapauksessa millimetreinä

käsiajonopeus%	X1 etu	X2 taka	Y1 vasen	Y2 oikea
<b>100</b>	6	6,05	6,1	6
<b>90</b>	5,9	5,9	6,1	6,1
<b>80</b>	6,05	6	6	6
<b>70</b>	5,85	5,85	6,05	6
<b>60</b>	5,95	6	6,1	6,05

Kuuden millimetrin sivunpaksuuteen on mittaustulosten perusteella päästy melko hyvin. Absoluuttinen virhe oli kaikista arvoista laskettuna 0,0575 mm ja suhteellinen virhe noin 1 %.

Mittauksista voidaan tosin nähdä, että 80 %:n ajonopeudella päästään lähimmäksi 6 millimetriä useammalla eri sivulla (3/4), huonoiten haluttuun tulostus-

paksuuteen on päästy 70 %:n ajonopeudella, jossa pahimmillaan paksuus on poikennut 0,15 mm halutusta 6 millimetristä. Syytä, miksi 80 %:n ajonopeudella on päästy lähimmäksi 6 millimetrin seinämäpaksuutta, on vaikea arvioida ja syy saattaa olla jopa niinkin yksinkertainen, kuin sopivasti valitut mittauskohdat.

Tästä huolimatta 80 %:n ajonopeus valittiin vertailukohdaksi, vaikkakin seinämän paksuuksien mittausten lukumäärä on liian pieni, että tästä voisi vetää mitään varmoja johtopäätöksiä.

#### 4.4.2 Eri käsiajonopeuksien vertailu

Eri ajonopeuksien vertailua varten datasettiin lisättiin yksi sarake, joka kertoo millä ajonopeusprosentilla on kulloinenkin mittaus suoritettu. Tähän jaotteluun käytettiin samoja indeksiarvoja kuin siistityn datasetin jakamisessa neljään eri mittaukseen. Tätä saraketta voidaan nyt käyttää luokittelussa apuna.

Viulukuvio kuvaa numeerisen datan jakautumista yhteen tai useampaan ryhmään hyödyntämällä tiheyskäyriä. Jokaisen käyrän leveys kuvaa datapisteiden esiintymistiheyttä kullakin alueella. Viulukuviot ovat erityisen hyödyllisiä, kun vertaillaan useamman havaintoryhmän mittaustulosten jakaumia. (Yi | A Complete Guide to Violin Plots, 2021)

Yleensä tiheyskäyrien lisäksi viulukuvioon on lisätty esimerkiksi laatikko-janakuvio, jonka avulla voidaan myös esittää muuttujan jakaumaa. Laatikkoon sijoittuu puolet havainnoista ja janojen ulkopuolella on neljä prosenttia havainnoista, yleensä ääriarvoja. Toisinaan nämä ääriarvot voidaan esittää erillisinä pisteinä. (Tilastokoulu | 2.4.3 Laatikko-janakuvio)

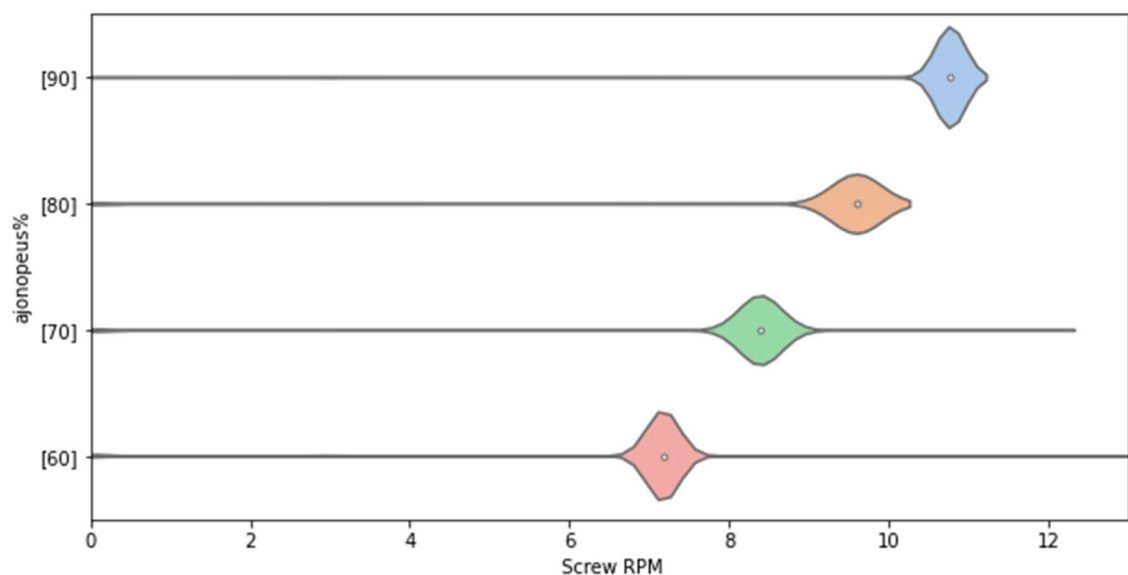
Tutkittava datasetti koostuu neljästä eri mittauksesta, joissa on useampia eri sarakkeita mittaustuloksille. Tässä tapauksessa viulukuvio on tehokas: viulukuvion avulla voidaan tehdä jakaumakuvaajat aina yhdelle akselin mittaukselle (liike, aika, nopeus ja Ext torque) ja vertailla kuvaajia helposti keskenään sekä mahdollisesti löytää jotain optimoinnin kannalta hyödyllistä tutkitusta datasta.

Seuraavissa kappaleissa on käsitelty eri mittausarvojen viulukuviot. Robotin akselin osalta kuviot on jaoteltu liikkeeseen, nopeuteen, aikaan ja ext torqueen (mittausarvo robotilta, joka kuvaa robotin arvioimaa ulkoista momenttia nivelelle X, ei suomenkielistä lyhyttä vastinetta). Viulukuviosta on kaikissa näissä käytetty sellaista versiota, jossa viulukuvion keskellä on laatikko-janakuvio. Viulukuvioissa tulee vertailla keskenään vain yhden kuvaajan sisällä olevia viulukuvaajia: esimerkiksi J1 liikkeen eri viulukuvaajia ei tulisi verrata J2 liikkeen viulukuvaajiin.

#### 4.4.3 Screw RPM (ruuvin pyörintänopeus) ja TCP-nopeus

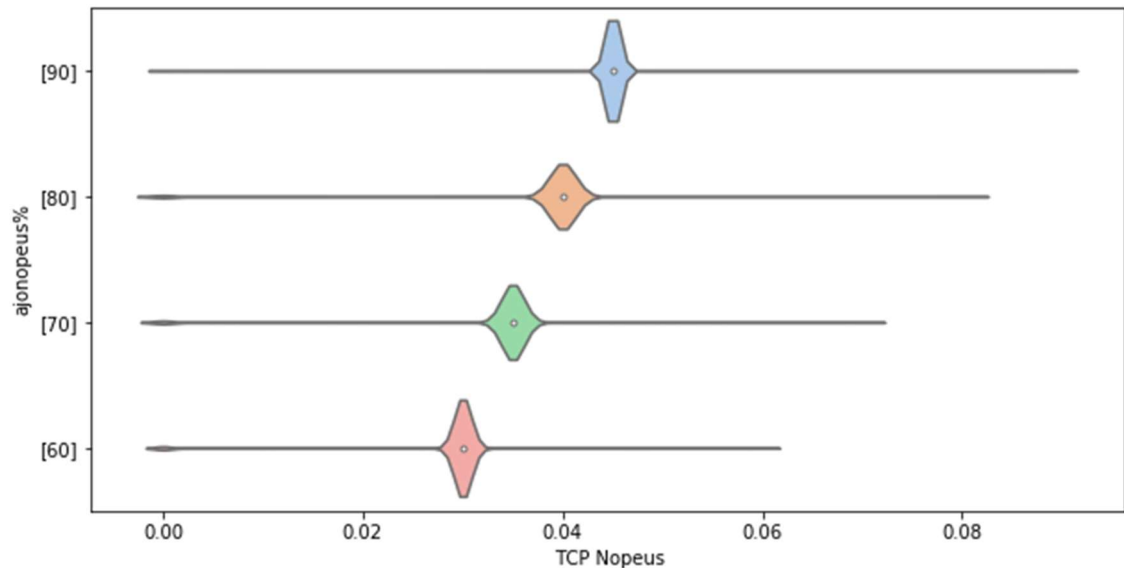
Screw RPM:n (ruuvin pyörintänopeus) viulukuviot on esitetty kuviossa 3. Kuvioista voidaan nähdä, että nopeus ei ole jakautunut millään ajonopeusprosentilla kovin leveälle ja jakaumissa voidaan nähdä selkeät piikit. Kaikissa kuvioissa tosin on näkyvissä se, että tuloksissa on mukana mittauspisteitä, joissa ruuvin pyörintänopeus on nollassa: kohdat, jossa tehdään säätöjä ja robotti ei liiku. Tämä selittää vasemman laidan pitkän janan kaikissa neljässä viulukuviossa.

70 %:n ja 60 %:n ajoissa jana havaitaan myös kuvion oikealla puolella. Taulukosta 4 nähdään kuitenkin, että 70 %:n ajossa maksimi on ollut 11,8 ja 60 %:n ajossa 14,4. Kummassakin tapauksessa kyseessä on ollut yksittäinen mittaus ja kumpikin liittyvät hetkeen, jolloin robotti on lähtenyt liikkeelle.



KUVIO 3: Ruuvin pyörintänopeuden viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla

Vastaavanlaisia trendejä on havaittavissa myös TCP-nopeuden tapauksessa (kuvio 4). Suurin osa mittauksista mahtuu hyvin kapean jakauman sisälle, mutta tällä kertaa kaikissa ajonopeusprosentteissa on havaittavissa myös suurempia nopeuksia. Tarkastellessa datasettiä selviää kuitenkin, että kyse on jälleen ker-  
ran hetkistä, jolloin robotti lähtee liikkeelle paikallaolon jälkeen.

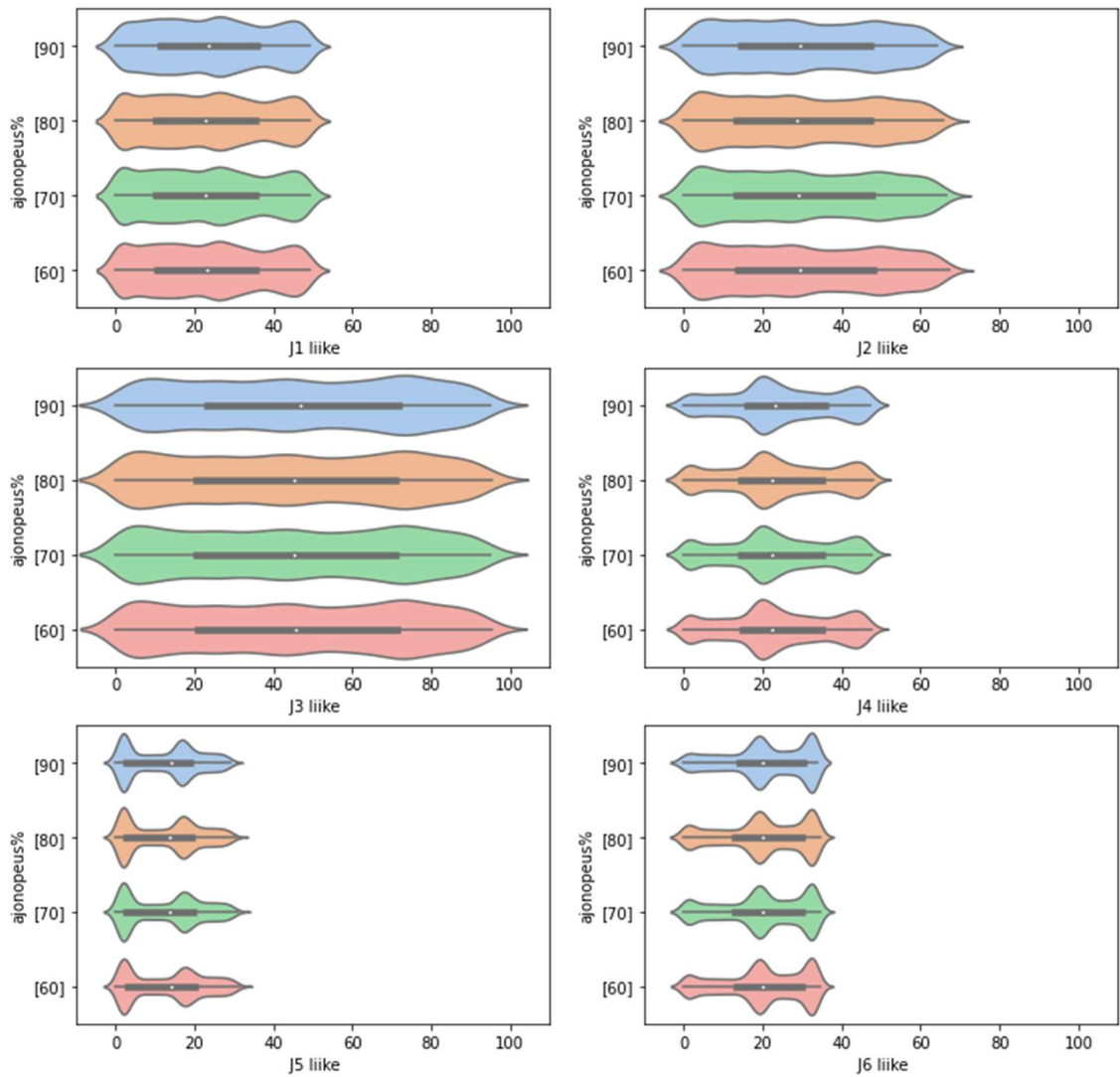


KUVIO 4: TCP-nopeuden viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla

Lisäksi kuvio 4 nähdään, että jakaumien huiput ovat pienemmässä nopeudessa, kun käsiajonopeutta on laskettu, mikä oli toisaalta myös odotettavaa ja tiedossa etukäteen.

#### 4.4.4 JX liike

JX liike (missä X on robotin nivelen numero, katso numerointi kuvasta 7) kuvaa robotin nivelen X liikettä asteina. Kuviossa 5 on esitetty eri akselien liikkeen viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla.



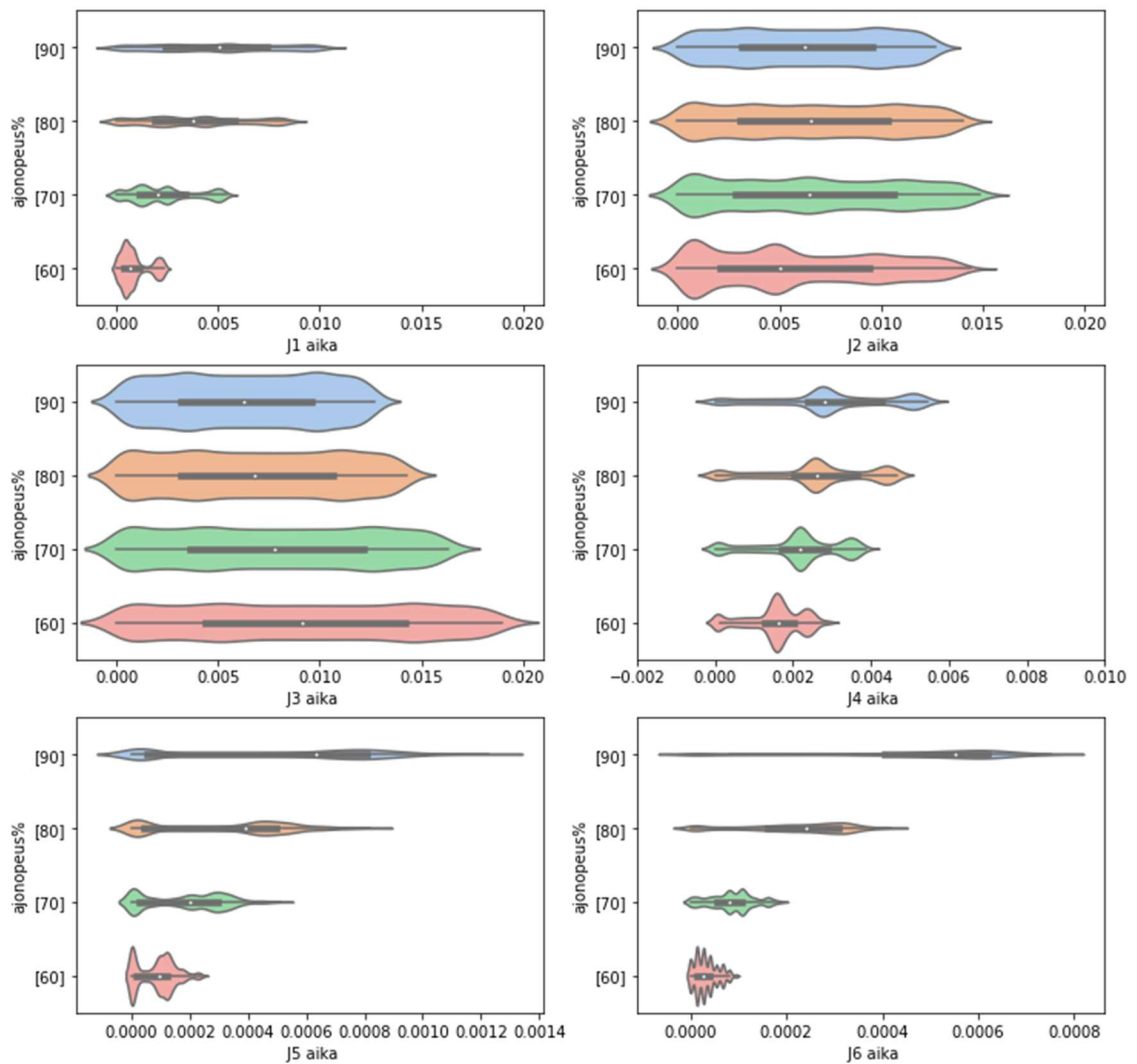
KUVIO 5: JX liikkeiden viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla

Viulukuvioista voidaan lähinnä nähdä, että eri akselien tapauksessa liikealueen laajuus on erilainen. Vaihteluväli on kaikissa tapauksissa lähes identtinen, kun katsotaan yksittäistä niveltä eri ajonopeusprosentteilla. Lisäksi on mainittava, että laatikko-janakuvion laatikko-osuus on jokaisen nivelen tapauksessa eri ajonopeusprosentteilla miltei samalla kohtaa. Tästä voidaan päätellä, että robotti on jokaisessa ajonopeudessa liikkunut hyvin samalla tavalla, kun tarkastellaan jokaista niveltä erikseen. Eri nivelien J liikkeiden viulukuvaajia ei voi vertailla keskenään, johtuen robotin rakenteesta (kuva 7).

#### 4.4.5 JX aika

JX aika kuvaa robotin nivelen liikkumaa aikaa sekunneissa. Kuviossa 6 on esitetty robotin eri nivelien JX aikojen viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla. Kuvi-

oista on hyvä huomata, että nivelien 1-3 tapauksessa x-akselit ovat samalla asteikolla, mutta nivelien 4-6 tapauksessa on täytynyt ottaa pienempi asteikko, koska muuten kuvaaja ei olisi ollut kovin selkeä.

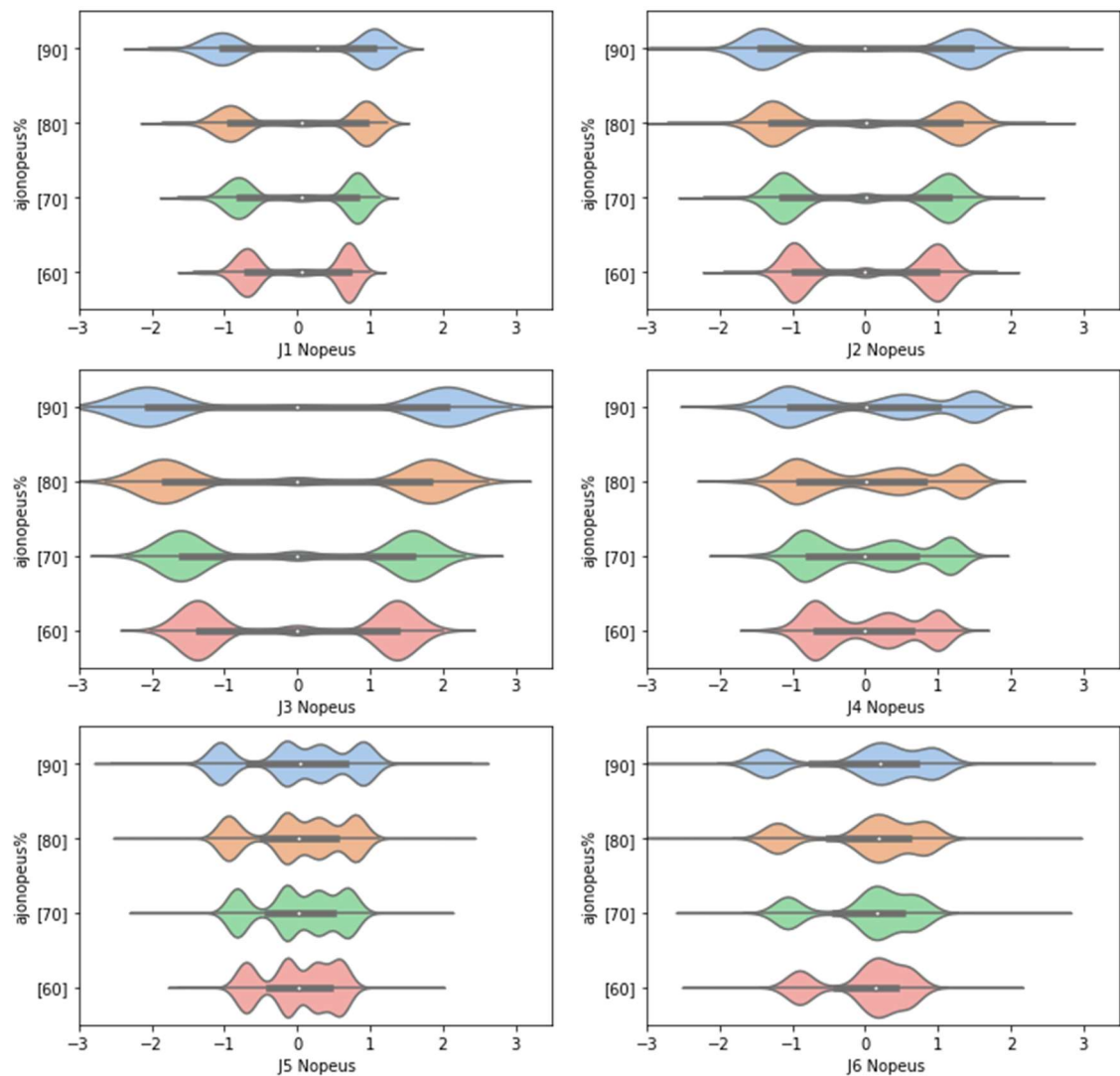


KUVIO 6: JX aika viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla

Nivelien 1, 4, 5 ja 6 tapauksissa aika lyhenee, kun ajonopeus hidastuu. Nivelen 2 tapauksessa ajan jakaumat ovat lähes samanmuotoisia. Nivelen 3 tapauksessa ajan jakauman leveys kasvaa, kun ajonopeusprosentti pienenee. Sekä nivel 2 että nivel 3 ovat sellaisia robotin niveliä, joiden liikerata on huomattavasti suurempi, kuin muiden nivelien. Tämä todennäköisesti selittää erot jakaumakuvis-  
sa.

#### 4.4.6 JX nopeus

JX nopeudella tarkoitetaan robotin nivelen X nopeutta (mm/s). Kuviossa 7 on esitetty robotin eri nivelien nopeudet eri ajonopeusprosentteilla.



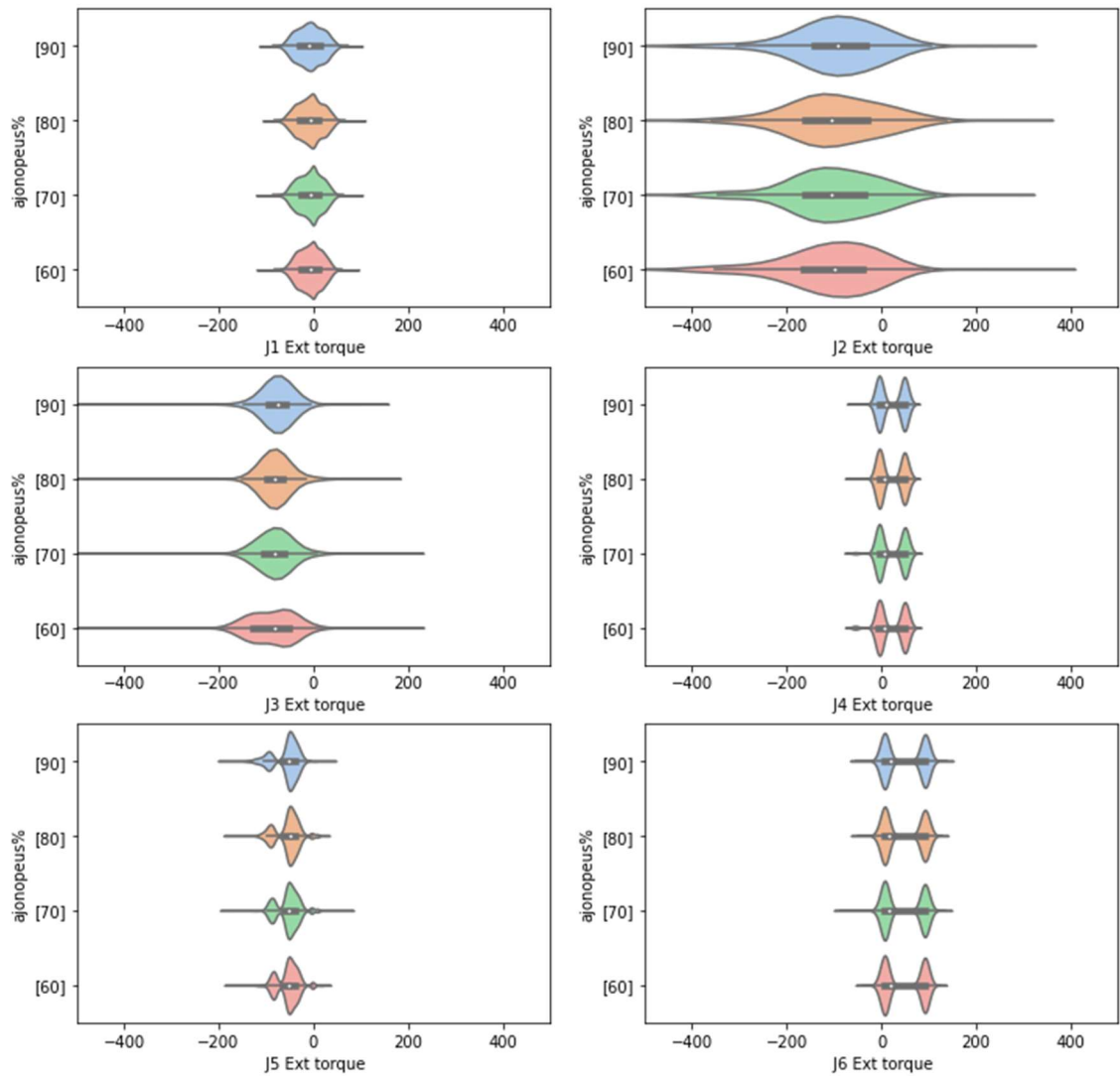
KUVIO 7: JX nopeuden viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla

Etukäteen oli tiedossa, ettei JX nopeus välttämättä ole paras mittaustapa, koska se ei ole yksiköllisesti staattinen. Tämä voidaan nähdä myös jakaumakuvista. Nivelissä 1 - 3 on nähtävillä kaksi selkeää huippua, mutta kuvaajat ovat hyvin samanlaisia huolimatta siitä mikä ajonopeusprosentti on käytössä. Nivelien 4 - 6 tapauksessa huippukohtia on jakaumissa useita ja ne näyttävät jakaantuneen laajalle alueelle. Kaikissa nivelien kuvaajissa on kuitenkin havaittavissa, että jakauman leveys kapenee, kun ajonopeusprosentti laskee. Kuvaajista voidaan

siis havaita, että robotti on liikkunut hitaammin, kun ajonopeusprosentti on pienentynyt.

#### 4.4.7 JX Ext torque (robotin arvioima ulkoinen momentti nivelelle X)

JX Ext torquella tarkoitetaan robotin arvioimaa ulkoista momenttia nivelelle X. Kuviossa 8 on esitetty JX Ext torquen viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla.



KUVIO 8: JX Ext torquen viulukuviot eri ajonopeusprosentteilla

JX Ext torque ei tarjoa juuri mitään mielenkiintoista optimoinnin kannalta. Kuviot ovat hyvin samanmuotoisia, erot ovat lähinnä hyvin pieniä jakauman huipun ja leveyden osalta eri ajonopeusprosentteilla.

#### 4.4.8 Johtopäätöksiä viulukuvaajista

Viulukuviot olivat tässä tapauksessa hyvä tapa tarkastella dataa, vaikkakaan mitään optimoinnin kannalta hyödyllistä niistä ei voida löytää. Kuvioiden perusteella saattaisi kuitenkin olla mahdollista tunnistaa, mistä nivelestä on missäkin tapauksessa kyse, sillä nivelien toiminta eroaa toisistaan siinä määrin että ne ovat graafisesti kuvaajan avulla toisistaan erotettavissa. Erityisen hyvin tässä onnistuvat JX aika, JX nopeus ja JX ext torque.

Viulukuvioiden perusteella voidaan havaita, että mitattu datasetti ei ole riittävä siihen, että jonkinlaisia arvioita tulostuksen optimoinnin suhteen voitaisiin tehdä. Viulukuvioista ei havaita riittäviä eroja eri ajonopeusprosentteilla, että voitaisiin näiden perusteella optimoida tulostusta. Lisäksi on huomioitava, että robotit ovat yksilöitä ja nämä tulokset pätevät suoraan vain mittauksissa käytetyille robotille.

## 5 POHDINTA

Tässä työssä kävi, kuten data-analyysissä usein saattaa käydä: eniten aikaa kului datan siivoamiseen, manipulointiin ja siihen tutustumiseen kuin varsinaiseen data-analyysiin.

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli perehtyä siihen, millaista dataa tällaisessa tulostusprosessissa syntyy, mitä siitä voidaan nähdä ja voidaanko dataa hyödyntää jotenkin esimerkiksi tulostusprosessin ja -jäljen optimoinnissa. Näistä tavoitteista ensimmäinen toteutui: jos dataa kerätessä ei olla tarkkana datan joukkoon saattaa päätyä sellaista, mikä sinne ei kuulu. Lisäksi on täysin mahdollista, että jotain data-analyysin kannalta oleellista jää tallentumatta. Mitään erityisiä trendejä tai havaintoja datasta oli vaikea löytää ja siihen on useita syitä. Edellisestä johtuen tätä dataa ei voi hyödyntää optimoinnissa.

Suurimmaksi haasteeksi tulostuksen ”hyvyyden” määrittelyn suhteen jäi tulostetun kappaleen sivun paksuuksien mittauspisteiden lukumäärä. Esimerkiksi tulostetun kappaleen sivunpaksuuksia olisi jatkotutkimuksissa syytä mitata enemmän, kuin yksi mitta per sivu 20 kerroksen välein. Mikäli tällaista mittausdataa olisi ollut enemmän, ei tulostuksen hyvyyden arviointi olisi niin arpapeliä. Nyt ei voida varmaksi sanoa, että 80 %:n ajonopeus on oikeasti se paras, koska mittauksia sivun paksuuden osalta on niin vähän. Lisäksi tässä täytyy ottaa huomioon inhimilliset tekijät: jos mittausta olisi suoritettu vähän eri kohdasta, olisivatko tulokset olleet tällöin erilaiset ja jollain toisella ajonopeusprosentilla olisi mittauksen perusteelta löydetty paremmin kuuden millimetrin paksuuteen osunut tulostusjälki?

Jatkon suhteen suositeltavaa olisi tarkastaa datankeräysmoduulin toimivuus. Nyt datasetissä oli useita kohtia, joissa jotain nollaantumista oli tapahtunut ja yksi ajo jäi näiden seikkojen takia kokonaan löytymättä. Suurin osa tämänkin työn suorituksesta kului datan siivoamiseen ja sieltä oikean datasetin etsimiseen.

Kunhan datan keräysmoduulin koodi on todettu toimivaksi, olisi järkevää tehdä uusintatulostuksia samantyyppistä kappaletta tulostaen, mutta miettiä samalla

tarkemmin, miten nopeutta säädetään ja missä kohdin ja miten monta mittausta esimerkiksi sivujen paksuuksista tarvitaan, että datasta voidaan saada jotain oikeaa tietoa. Lisäksi olisi syytä määritellä tarkemmin, mikä on ”riittävän hyvä” tulostusjälki.

Datan analysoimisen helpottamiseksi olisi syytä paloitella tulostettujen kappaleiden/ajonopeusprosentin mukaan robotin käyttäjän toimesta omiin tiedostoihinsa. Lisäksi olisi järkevää tehdä kirjallinen keräyssuunnitelma ja koostaa keräyspöytäkirja yhdessä datan kerääjän ja datan käsittelijän kanssa. Suunnitelman avulla kaikki osapuolet olisivat selvillä siitä, mitä data sisältää, miten se on kerätty ja että se on oikean muotoista.

Mikäli vastaava tulostusprosessi toteutetaan vielä uudestaan, kappaleen sivujen paksuuksia olisi syytä mitata useammasta kohtaa. Koska kappaleen sivut näyttävät hieman pyöristetyiltä, olisi näihin mittauksiin syytä lisätä myös paksuusmittaukset kappaleen kulmista.

Yksi mielenkiintoinen lähestymiskulma datan tarkasteluun on tulostettavan kappaleen asento suhteessa robottiin. Jatkossa voisikin olla mielenkiintoista toistaa vastaava koe ja tutkia miten tulostettavan kappaleen asento ja sijainti robottiin nähden vaikuttaa saatavaan dataan. Toinen mielenkiintoinen lähestymiskulma asian tutkimiseen olisi kerätä dataa erimuotoisten kappaleiden tulostamisesta: miten esimerkiksi suuri määrä käännöksiä vaikuttavat kerättävään dataan ja tulostusjälkeen?

Jos tulostetusta kappaleesta kerättäisiin enemmän mittauksia seinämän paksuudesta ja kappaleita, joiden tulostusprosessin dataa olisi enemmän, datasta saattaisi olla mahdollista kehittää ennustusmalli seinämän paksuudelle koneoppimista hyödyntäen. Tämän avulla voisi olla mahdollista ennakoita kappaleen kannalta parasta tulostusjälkeä simuloitulla datalla. Tässä tapauksessa 3D-mallin perusteella simuloitaisiin ja kerättäisiin simuloinnista dataa, jonka perusteella koneoppimismalli ennustaisi tulostettavan kappaleen seinämän paksuuden.

Oma tavoite, perehtyminen data-analyysiin syvemmin toteutui jossain määrin. Osa funktioista ja menetelmistä oli ennestään tuttuja, mutta erityisesti datan visualisoinnin osalta oli mahdollisuus tutustua uusiin tapoihin. Esimerkiksi viulukuvio oli uusi asia ja se todettiin toimivaksi tavaksi kuvata eri mittausten jakaumia normaalin jakaumakuvaajan tai laatikko-janakuvion sijasta. Lisäksi oli todella opettavaista päästä kokeilemaan aiemmin opittuja asioita oikean data-setin kanssa, siistityn ja moneen kertaan pureskellun testi- tai opetuskäyttöön suunnitellun datan sijaan.

## LÄHTEET

Barnatt, C. 2016. 3D printing. Third edition. United States: ExplainingTheFuture.com.

ABB Robotics. IRB 4600 | ABB Robotics. Verkkosivu. Viitattu 10.10.2022 <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-4600>

ABB Robotics. IRBT 2005 for IRB 1520, 1600, 2600, 4600. Verkkosivu. Viitattu 17.10.2022 <https://new.abb.com/products/robotics/application-equipment-and-accessories/robot-positioners-track-motion/irbt-2005>

ISO 8373:2021 Robotics — Vocabulary. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Luettu: 14.11.2022 Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/ISO/ISO/ID9998/8/1043935.html.stx>.

ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. International Organization for Standardization. Viitattu: 26.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en>

Kuivanen, R. 1999 Robotiikka. Helsinki: Talentum.

Manoj Prabhakar, M. et al. 2021. A short review on 3D printing methods, process parameters and materials. Materials Today: Proceedings. 45, pp. 6108–6114.

pandas - Python Data Analysis Library. Verkkosivu. Viitattu: 26.3.2023. <https://pandas.pydata.org/about/>

Patil, P. 2022. What is Exploratory Data Analysis?, Medium. Verkkosivu. Viitattu: 12.3.2023. <https://towardsdatascience.com/exploratory-data-analysis-8fc1cb20fd15>

Professional 3D Printing Software | Simplify3D. Verkkosivu. Viitattu 17.10.2022. <https://www.simplify3d.com/>

Rice, M. 2023. 17 Key 3D Printing Applications & Examples to Know 2023 | Built In. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023. <https://builtin.com/hardware/3d-printing-applications-examples>

RobotStudio 3D Printing PowerPac, presentation, pdf-file. Verkkosivu. Viitattu 17.10.2023. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A2114&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>

Tapiola, P. 2023. Maailman ensimmäinen 3D-tulostettu avaruusraketti on määrä laukaista huomenna. Yle Uutiset. Verkkosivu. Viitattu: 12.3.2023. <https://yle.fi/a/74-20021296>

Taylor, S. 2023. Correlation. Corporate Finance Institute. Verkkosivu. Viitattu 15.4.2023. <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/data-science/correlation/>

Tilastokoulu. 4.3 Korrelaatio. Verkkosivu. Viitattu 26.3.2023. [https://tilastokoulu.stat.fi/verkkokoulu\\_v2.xql?course\\_id=tkoulu\\_tilaj&lesson\\_id=4&subject\\_id=3&page\\_type=sisalto](https://tilastokoulu.stat.fi/verkkokoulu_v2.xql?course_id=tkoulu_tilaj&lesson_id=4&subject_id=3&page_type=sisalto)

Tilastokoulu. 2.4.3 Laatikko-janakuvio. Verkkosivu. Viitattu 11.3.2023. [https://tilastokoulu.stat.fi/verkkokoulu\\_v2.xql?page\\_type=sisalto&course\\_id=tkoulu\\_tilaj&lesson\\_id=2&subject\\_id=21](https://tilastokoulu.stat.fi/verkkokoulu_v2.xql?page_type=sisalto&course_id=tkoulu_tilaj&lesson_id=2&subject_id=21)

Vincent. E25, CEAD | Large Scale Additive Manufacturing. Verkkosivu. Viitattu: 17.10.2023. <https://ceadgroup.com/solutions/technology-components/e25/>

Waskom, M. 2021. seaborn: statistical data visualization. Journal of Open Source Software. 6(60), p. 3021. <https://doi.org/10.21105/joss.03021>.

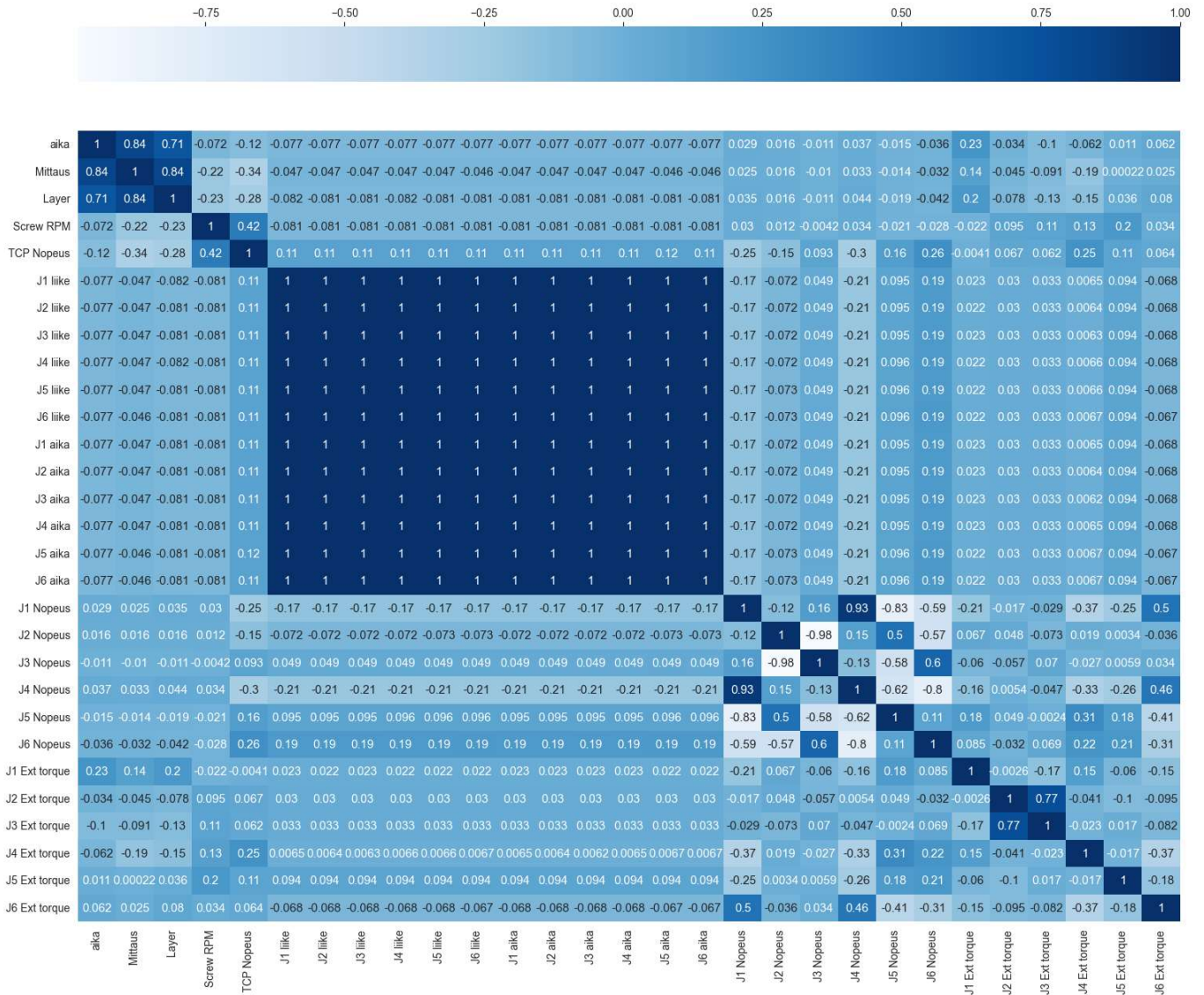
What is NumPy? — NumPy v1.24 Manual. Verkkosivu. Viitattu: 12.3.2023. <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html>

Yi, M. 2021. A Complete Guide to Violin Plots, Chartio. Verkkosivu. Viitattu 11.3.2023. <https://chartio.com/learn/charts/violin-plot-complete-guide/>

Yi, M. 2021. A Complete Guide to Heatmaps, Chartio. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023. <https://chartio.com/learn/charts/heatmap-complete-guide/>

# LIITTEET

Liite 1. Koko datasetin heatmap ja korrelaatiomatriisi ennen datan siistimistä.



Liite 2. Siistityn datan heatmap ja korrelaatiomatriisi

